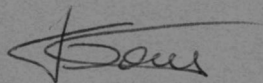


0-781422

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи



Башаков Андрей Александрович

Построение фазовых  
динамических моделей  
звездных систем

Специальность 01.03.01 — астрометрия и небесная механика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

**Орлов Виктор Владимирович**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

**Бобылев Вадим Вадимович,**

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН;

кандидат физико-математических наук

**Сотникова Наталья Яковлевна,**

Санкт-Петербургский государственный университет.

Ведущая организация:

Волгоградский государственный университет.

Защита состоится 20 апреля 2010 г. в 15 ч. 30 м. на заседании совета Д 212.232.15 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан "18" 02 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Орлов В.В.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000590921

# 1 Общая характеристика работы

## 1.1 Актуальность темы

Проблемы строения, формирования и эволюции нашей и других галактик являются одними из самых актуальных в современной звездной астрономии. Одним из способов, позволяющим добиться понимания динамических процессов, происходящих в галактиках, является построение фазовых моделей звездных систем и численное моделирование системы частиц в рамках задачи  $N$  тел. Распределение пространственной плотности получаемых систем должно соответствовать наблюдательным данным или в общем случае наперед заданному закону, при этом обычно рассматриваются модели, близкие к равновесию. Одним из способов построения фазовых моделей является метод, предложенный в 1979 году Мартином Шварцшильдом. Метод относится к численным, и на ранних этапах использовался не очень широко из-за отсутствия достаточных вычислительных мощностей. Однако с развитием компьютеров эта проблема отошла на второй план, а возможность хорошо аппроксимировать заданное распределение плотности и некоторые другие параметры делают метод Шварцшильда привлекательным для решения задач по построению фазовых моделей звездных систем.

Методы численного моделирования и исследования системы частиц в рамках задачи  $N$  тел также важны. Часто используют термин “численный эксперимент”, когда подразумевается численное моделирование и прослеживание эволюции системы гравитирующих  $N$  тел. В настоящей работе эти методы применяются для тестирования и исследования построенных модифицированным методом Шварцшильда моделей, так как при численном построении всегда имеются некоторые отклонения параметров в получающемся распределении плотности и соответственно от заданного гравитационного потенциала. Эти отклонения, в свою

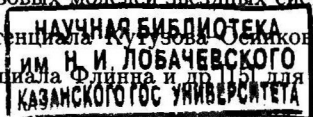
очередь, могут привести к еще большему перераспределению плотности и уходу от заданного потенциала. Поэтому найденную модель необходимо проверить, насколько она получилась равновесной и устойчивой и сохраняет свои параметры.

В данной работе решаются вопросы реализации метода Шварцшильда на современном уровне и его модификации для расширения области применения. Разработаны и реализованы алгоритмы перехода от моделей, состоящих из набора фазовых траекторий, к дискретным моделям, представленным системой  $N$  точечных масс. Также дается описание построенных с помощью созданного программного комплекса фазовых моделей звездных систем.

## 1.2 Цели работы

В данной работе были поставлены следующие цели.

- Модификация метода Шварцшильда для построения фазовых моделей звездных систем.
- Разработка и создание программного комплекса для построения фазовых моделей звездных систем с применением алгоритмов модифицированного метода Шварцшильда.
- Разработка метода перехода от моделей, состоящих из набора фазовых траекторий, к дискретным моделям, представленным системой  $N$  точечных масс, и получения начальных данных для моделирования задачи  $N$  тел.
- Апробация разработанных алгоритмов и программ на модельной задаче построения фазовой модели со сферическим потенциалом Пламмера [13].
- Построение фазовых моделей звездных систем на основе двухкомпонентного потенциала Кулзуова-Осейкова [9, 10] и трехкомпонентного потенциала Флигга и др [15] для Галактики.





- Проверка полученных моделей на равновесность и устойчивость.

### 1.3 Научная новизна

В данной работе впервые применен метод Шварцшильда [16] с новым алгоритмом вычисления весов орбит, основанным на made-to-measure (M2M) алгоритме [1, 8]. Данная модификация позволяет учитывать кинематические характеристики при построении моделей. Добавлена возможность применения ячеек с переменными размерами и разной геометрической формы. С использованием модифицированного метода Шварцшильда были построены фазовые модели на основе потенциала Флинна и др. [15] для Галактики.

Разработан алгоритм дискретизации, позволяющий получать дискретные системы  $N$  тел (материальных частиц) из моделей, основанных на фазовых траекториях. Алгоритм используется для исследования построенных моделей на равновесность и устойчивость.

Впервые этим методом построены фазовые модели осесимметричных звездных систем на основе потенциалов Кутузова-Осипкова [6] и Флинна и др. [2] для Галактики. Исследована их равновесность и устойчивость. Показано, что разработанный метод пригоден для решения поставленных задач.

### 1.4 Научная и практическая значимость работы

В результате проделанной работы разработан и апробирован новый комплекс алгоритмов и программ, предназначенных для построения фазовых моделей звездных систем по заданному потенциалу. Данный комплекс основан на синтезе метода Шварцшильда [16] и M2M алгоритма [1, 8]. Новый модифицированный метод Шварцшильда позволяет строить фазовые модели звездных систем по заданному потенциалу и/или распределению плотности. Преимущества нового метода заключаются в возможности построения фазовых моделей на основе только распреде-

ления вещества без дополнительных предположений о наличии интегралов движения. С введением улучшенного метода расчета весов появилась возможность построения моделей с учетом заданных параметров скоростей. Результатом работы метода является модель в виде набора фазовых траекторий и в виде набора фазовых координат точечных масс, которые могут быть использованы как входные данные для численного решения задачи  $N$  тел.

## **1.5 Апробация работы**

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах Кафедры небесной механики СПбГУ и лаборатории небесной механики и звездной динамики Математико—механического факультета СПбГУ, 2006–2009 гг.; на общегородском семинаре по звездной динамике им. К.Ф. Огородникова 2006–2009 гг.; на Всероссийской конференции “Звездные системы” к 100-летию П.П.Паренаго, Москва, 24–26 мая 2006 г.; на конференции “БАК-2007”, Казань, 17–22 сентября 2007 г.; на международной конференции “Dynamics of galaxies”, Пулково, 2007 г.; на семинаре обсерватории Университета г. Турку, Финляндия, 2008 г.

## **1.6 Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы – 95 страниц текста, включая 27 рисунков, 3 таблицы и список литературы, содержащий 56 наименования.

# **2 Краткое содержание работы**

Введение включает в себя обоснование актуальности темы диссертации, в нем сформулированы основные цели и задачи работы, указаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Кратко представлены структура и содержание диссертации, указаны пе-

чатные работы, в которых отражены основные результаты, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Вторая глава** носит обзорный характер и посвящена описанию подходов и методов, используемых при моделировании звездных систем. Рассмотрены основные предпосылки, послужившие толчком к развитию данного направления звездной динамики. Описаны этапы в развитии применявшихся подходов. Представлено несколько методов построения фазовых моделей, основанных на других принципах, рассмотрены их сильные и слабые стороны. Подробно описан метод, разработанный Мартином Шварцшильдом [16] и послуживший основой для данной работы. В нем процесс построения модели представляет собой процедуру нахождения весов орбит, заранее просчитанных в заданном потенциале, а результатом работы метода является фазовая модель из суперпозиции траекторий, отобранных с помощью этого метода.

Также в этой главе рассмотрен M2M метод, разработанный Сэйером и Тремейном [17], и его модификация Де Лоренци и др. [14], в котором основным кирпичиком, используемом при построении, является частица вместо орбиты в методе Шварцшильда. Такой подход обладает некоторыми преимуществами перед описанным выше методом Шварцшильда, но вместе с тем имеет и существенный недостаток: результат работы метода представляет собой набор частиц с разными массами, что может вызвать проблемы при исследовании эволюции моделей.

Описан численный итерационный алгоритм Родионова и Сотниковой [11], который относится к методам, оперирующим с частицами, но в отличие от M2M, изменяются не массы частиц, а их фазовые координаты.

**Третья глава** диссертации содержит описание реализации модифицированного метода Шварцшильда, основных шагов построения модели, задач, возникающих при программной реализации и в процессе нахождения моделей, а также путей их решения.

Первый параграф содержит общее описание метода Шварцшильда, предпосылок и допущений, использовавшихся при его разработке. Опи-

саны сильные и слабые стороны метода, рассмотрены вопросы о самосогласованности и устойчивости построенных моделей.

Второй параграф содержит описание шагов, использующихся в процессе работы метода.

Третий параграф описывает использовавшиеся при построениях методы деления исследуемого пространства на ячейки. Ячейки используются для набора статистики и сравнения требуемых параметров модели—образца и построенной нами модели, в частности распределения массы вещества, компонент скоростей и их дисперсий. Представлены разные варианты разбиения пространства модели: на прямоугольные ячейки с постоянным шагом, и на ячейки с криволинейными границами и переменным шагом дробления. Показаны преимущества и недостатки каждого подхода. В частности, при равномерном дроблении мы имеем низкое пространственное разрешение в центральной, наиболее важной части модели, но расчет статистики при этом сильно упрощается. Применяя криволинейные ячейки с переменным шагом, мы, с одной стороны, уменьшаем размерность разбиения, используя симметрию модели; с другой стороны, повышаем разрешение в необходимых областях без увеличения количества ячеек, но при этом возрастает сложность расчета статистики. Также в этом параграфе описана проблема, связанная с определением достаточного времени расчета траектории, и предложено несколько вариантов ее решения.

В четвертом параграфе рассказывается о процедуре создания набора (библиотеки) орбит — исходного материала для построения модели. Процесс включения траекторий в библиотеку важен, поскольку необходимо максимально полно представить многообразие траектории, возможных для данного потенциала с учетом ограничений на общее количество орбит в библиотеке. В случае если исходная библиотека окажется скудной, построение приемлемой модели может стать невозможным. Поэтому вопрос распределения орбит по параметрам запуска является одним из главных. Метод Шварцшильда не накладывает условий на наличие у мо-

делируемого потенциала дополнительных интегралов движения, однако для удобства классификации орбит были использованы значения интегралов площадей и энергии. В данном параграфе рассмотрено несколько подходов к выбору сетки начальных данных. По результатам многочисленных моделирований был сделан вывод, что лучших результатов удастся добиться, используя частое дробление по интегралу площадей (радиусу круговой орбиты), и редкое, но с экспоненциальным шагом дробление по интегралу энергии. В качестве дополнительного параметра использовался или радиус запуска, или угол наклона вектора скорости к оси  $R$  в сопутствующей плоскости.

Пятый параграф содержит описание алгоритмов, использующихся для вычислений весов орбит. Данная часть метода является одной из важнейших. Из сравнения заданного распределения вещества с распределением, полученным с помощью суперпозиции орбит с искомым набором весов, определяются новые значения весов, при которых улучшается распределение вещества и уменьшаются различия моделей. Для вычисления весов использовались симплекс—метод [1, 8] и алгоритм из M2M метода [17, 14]. Симплекс—метод — алгоритм линейной алгебры, используется для решения системы неравенств, где пределами являются заданные значения масс в ячейках, при условии максимизации суммы весов (все веса неотрицательны). Данный алгоритм использовался на ранних этапах разработки метода. Обладая относительной простотой реализации, алгоритм имеет несколько существенных недостатков: сильная зависимость времени решения от количества уравнений и неизвестных, накопление ошибок округлений из-за постоянных операций над главной матрицей.

В процессе работы симплекс—метод был заменен на итерационно-дифференциальный алгоритм (M2M). Обладая сравнительно высокой скоростью работы и давая на выходе более сглаженное распределение весов, новый алгоритм в процессе вычислений позволяет учитывать требуемые кинематические параметры модели. В частности, в экспериментах по моделированию для потенциала Флинна и др. [15] использовались

значения тангенциальной скорости в плоскости  $XU$  в качестве заданных значений наравне с распределением пространственной плотности. Алгоритм обладает набором свободных параметров, выбор их значений также описывается в данном параграфе.

Шестой параграф посвящен описанию процесса тестирования построенных моделей на равновесность и устойчивость. Так как метод Шварцшильда не гарантирует устойчивость полученных моделей, то данная проверка необходима, она является частью модифицированного метода. На выходе классического метода Шварцшильда модель представляет собой суперпозицию орбит с весами. Для изучения эволюции такой модели была исследована эволюция эквивалентной модели, состоящей из  $N$  точечных масс, посредством иерархического алгоритма (TreeCode).

Седьмой параграф содержит описание особенностей, выявленных в процессе работы и связанных со способом формирования библиотеки орбит. Сделаны выводы о способах оптимизации заполнения библиотеки.

В четвертой главе обсуждаются рассматриваемые в работе гравитационные потенциалы, использованные для построения моделей и тестирования программ. Описаны модельный сферический потенциал Пламмера [13], двухкомпонентный потенциал Кутузова–Осипкова [9, 10] и трехкомпонентный потенциал Флинна и др. [15] для Галактики. Отмечены причины использования представленных потенциалов, приведены параметры потенциалов, рассмотрены их особенности. Обсуждается соответствие характеристик потенциалов наблюдательным данным.

Пятая глава содержит результаты моделирования для ряда заданных гравитационных потенциалов звездных систем. Описан процесс построения фазовой модели для тестового сферического потенциала Пламмера, имеющего известное аналитическое представление фазовой плотности. Дано описание построенной модели и ее эволюции [5]. Показана высокая эффективность работы метода.

Были построены фазовые модели для потенциалов Кутузова–Осипкова [9, 10] и Флинна и др. [15]. Все полученные модели проверены

на равновесность и устойчивость. Обсуждаются особенности кинематических характеристик, получившиеся при построении модели для потенциала Кутузова–Осипкова, связанные с чрезмерной “разогретостью” диска [6]. Показано, что они устранимы, на примере построения моделей для потенциала Флинна и др., найденных с использованием усовершенствованного метода Шварцшильда [2]. Анализируются трудности в получении желательных параметров кинематики и способы их преодоления, делаются общие выводы по результатам моделирования.

В **Заключении** формулируются основные результаты работы.

### **3 Положения, выносимые на защиту**

1. Выполнена и апробирована модификация метода Шварцшильда для построения фазовых моделей звездных систем.
2. Разработан и реализован программный комплекс для построения фазовых моделей звездных систем модифицированным методом Шварцшильда по заданному распределению плотности или потенциалу с учетом кинематических характеристик.
3. Предложен и апробирован метод перехода от модели из набора фазовых траекторий к дискретной модели, состоящей из точечных масс, с аппроксимацией пространственного распределения плотности и распределения скоростей фазовой модели.
4. Построены фазовые модели звездных систем на основе потенциала Кутузова–Осипкова и потенциала Флинна и др. для Галактики.

## 4 Список публикаций автора по теме диссертации

1. *Башаков А.А., Питьев Н.П., Осипков Л.П.* Constructing a self-consistent Galaxy model by Schwarzschild's method. // Звездные системы. Всероссийская конференция 24-26 мая 2006 г. к 100-летию П.П. Паренаго. Тезисы докладов. Москва, 2006, с. 6.
2. *Bashakov A.A., Pitjev N.P., Ossipkov L.P.* Constructing self-consistent galactic models by Schwarzschild's method // Astron. and Astrophys. Transactions, 2006, v. 25, N 2-3, p. 135-138.
3. *Башаков А.А.* Construction of self-consistent galactic models by Schwarzschild's method. Dynamics of galaxies. // Международн. конф. Пулково, 6–10 авг. 2007. Тезисы докладов, с. 25.
4. *Башаков А.А., Питьев Н.П.* Построение самосогласованных моделей звездных систем методом Шварцшильда // Вестник СПбГУ, 2007, сер. 1, вып. 3, с. 151–159.
5. *Башаков А.А.* Тестирование фазовых моделей звездных систем, построенных методом Шварцшильда // Вестник СПбГУ, 2008, сер. 1, вып. 4, с. 131–143.
6. *Башаков А.А.* Использование модифицированного метода Шварцшильда для построения фазовой модели Галактики // Вестник СПбГУ, 2009, сер. 1, вып. 3, с. 142–149.

## 5 Личный вклад автора

В совместных работах автор принимал участие в постановке задачи и анализе результатов. Им выполнена вся вычислительная работа и



реализация методов моделирования. Обсуждение постановки задачи и результатов проводились всеми авторами совместно.

## Список литературы

- [1] *Ашманов С.А.* Линейное программирование. М.: Наука, 1981.
- [2] *Башаков А.А.* Использование модифицированного метода Шварцшильда для построения фазовой модели Галактики // Вестник СПбГУ, 2009, сер. 1, вып. 3, с. 142–149.
- [3] *Башаков А.А.* Построение модели Галактики методом Шварцшильда. // Конференция ВАК-2007, Казань.
- [4] *Башаков А.А.* Construction of self-consistent galactic models by Schwarzschild's method. Dynamics of galaxies // Международн. конф. Пулково, 6–10 авг. 2007. Тезисы докладов, с. 25.
- [5] *Башаков А.А.* Тестирование фазовых моделей звездных систем, построенных методом Шварцшильда // Вестник СПбГУ, 2008, сер. 1, вып. 4, с. 131–143.
- [6] *Башаков А.А., Питъев Н.П.* Построение самосогласованных моделей звездных систем методом Шварцшильда // Вестник СПбГУ, 2007, сер. 1, вып. 3, с. 151–159.
- [7] *Башаков А.А., Питъев Н.П., Осипков Л.П.* Constructing a self-consistent Galaxy model by Schwarzschild's method. // Звездные системы. Всероссийская конференция 24-26 мая 2006 г. к 100-летию П.П. Паренато. Тезисы докладов. Москва, 2006, с. 6.
- [8] *Васильев Ф. П., Иваницкий А. Ю.* Линейное программирование. М: Факториал Пресс, 2003.
- [9] *Кутузов С.А., Осипков Л.П.* Двухкомпонентная модель гравитационного поля Галактики // Астрон. журн., 1989, т. 66, вып. 5, с. 965–973.

- [10] *Кутузов С.А., Осипков Л.П.* Оценка параметров двухкомпонентной модели Галактики интервальным методом // Сб. Вопросы небесной механики и звездной динамики, Алма-Ата, 1990, с. 110–116.
- [11] *Родионов С.А., Сотникова Н.Я.* Итерационный метод построения равновесных (N-body)-моделей звездных дисков // Астрон. журн., 2006, т. 83, № 12, с. 1095–1114.
- [12] *Bashakov A.A., Pitjev N.P., Ossipkov L.P.* Constructing self-consistent galactic models by Schwarzschild's method // Astron. and Astrophys. Transactions, 2006, v. 25, N 2-3, p. 135–138.
- [13] *Binney J., Tremaine S.* Galactic Dynamics. Princeton University Press, Princeton, 1987.
- [14] *De Lorenzi F., Debattista V.P., Gerhard O., Sambhus N.* NMAGIC: Fast parallel Implementation of a  $\chi^2$ -Made-To-Measure Algorithm for Modeling Observational Data // MNRAS, 2007, v. 376, p. 71–88.
- [15] *Flynn C., Sommer-Larsen J., Christensen P.R.* Kinematics of outer stellar halo // MNRAS, 1996, v. 281, p. 1027–1032.
- [16] *Schwarzschild M.* A numerical model for a triaxial stellar system in dynamical equilibrium. // Astrophys. J., 1979, v. 232, p. 236–247.
- [17] *Syer D., Tremaine S.* Made-to-measure N-body system // MNRAS, 1996, v. 282, p. 223–233.

---

Подписано к печати 26.01.10. Формат 60 × 84  $\frac{1}{16}$ .  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать цифровая. Печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ 4606.

---

Отпечатано в Отделе оперативной полиграфии химического факультета СПбГУ  
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26  
Тел.: (812) 428-4043, 428-6919





